بررسی عددی سه‌بعدی رسوب‌گذاری و کنترل آن در آب‌گیرهای جانبی رودخانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار SSIIM2 ★

(یادداشت پژوهشی)

حمید شاملو[۱]　　　　عادل اثنی عشری[۲]

چکیده *آب‌گیرها عموماً در شبکه‌های توزیع آب، کانال‌های آبیاری، شبکه‌های فاضلاب، تأسیسات مربوط به تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. عدم کنترل رسوب ورودی به آب‌گیرها باعث انتقال رسوبات به داخل کانال‌های آبیاری و تأسیسات می‌شود و مشکلاتی را برای قسمت‌های مختلف به‌وجود می‌آورد. به‌علت وجود ذرات معلق در آب، خسارت زیادی نیز به تأسیسات به‌کاررفته مثل پمپ و توربین وارد می‌گردد. در این مطالعه ابتدا شبیه‌سازی عددی جریان رسوبی در آب‌گیری از مسیر مستقیم یک کانال مستطیلی به‌کمک نرم‌افزار SSIIM2 صورت گرفته است. از میان پارامترهای اصلی مؤثر بر جریان، شکل مقطع عرضی کانال، شیب کانال‌های اصلی و آب‌گیر و شکل دهانه‌ی ورودی ثابت در نظر گرفته‌شد و اثر زوایای آب‌گیری ۴۵ الی ۹۰ درجه، نسبت دبی آب‌گیری ۰/۲ الی ۰/۵۷ و عدد فرود جریان ورودی ۰/۳۲ الی ۰/۴۸ بر نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر بررسی شد و با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرارگرفت که مطابقت خوبی بین مقادیر حاصل و نتایج آزمایشگاهی دیده شد. سپس برای بررسی عددی روش‌های کنترل رسوب، تأثیر صفحات مستغرق، طول آب‌شکن و فاصله‌ی آن از مقابل دهانه‌ی آب‌گیر به‌ازای نسبت‌های مختلف دبی آب‌گیری بررسی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که کارآیی صفحات با احداث آب‌شکن در ضلع مقابل آب‌گیر افزایش پیدا می‌کند و مقدار ورود رسوبات به آب‌گیر کاهش می‌یابد. هم‌چنین با جابه‌جایی آب‌شکن به‌اندازه‌ی دو برابر عرض دهانه‌ی آب‌گیر به بالادست کانال اصلی، مقدار ورود رسوبات به آب‌گیر به‌طور متوسط ۳۶٪ کاهش می‌یابد. سپس نتایج عددی حاصل با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفتند که مطابقت خوبی بین مقادیر حاصل و نتایج آزمایشگاهی دیده شد.*

واژه‌های کلیدی آب‌گیر جانبی، رسوب‌گذاری، روش‌های کنترل رسوب، مدل عددی SSIIM2، مدل آشفتگی K-ω.

3-D Numerical Investigation of Sedimentation and its Control at River Lateral Intakes by SSIIM2 Software

H. Shamloo　　　　A. Asnaashari

Abstract *The intakes usually have been used in water distribution networks, irrigation channels, sewage networks, and the water/wastewater treatment facilities, etc. Lack of sediment control entered to the intake channel is the main reason of entering sediments to the installation systems, which makes many problems for different parts. Due to suspended particles in water, the facilities used such as pumps and turbines are damaged. In this study, first, numerical simulation of sediment flow in an intake from a rectangular channel using SSIIM2 is investigated. Among the main parameters affecting the flow the channel cross-section, main channel and intake slope, and the entrance form are supposed to be constant. Then, the effects of the deviation angles 45-90 degree, ratio of diverted discharge 0.2-0.57, and Froude Number 0.32-0.48 on ratio of sediment entering to the intake have been investigated and obtained numerical results were compared with experimental results that good agreement has been observed. Then for numerical investigation of sediment control methods the effects of the submerged vanes, spur dike length, and spur dike distance from the front intake entrance for different ratios of diverted discharge were investigated. The results showed that the effective performance of the vanes increased and consequently eliminated the bed sediment ingestion into diversion with a single spur dike at opposite side of the intake. Also an average reduction of 36% in sediment ingestion into diversion was observed when a spur dike located at a distance of twice intake width from the centre line. Then obtained numerical results have been compared with experimental results that good agreement has been observed.*

Keywords Lateral intake, Sedimentation, Sediment control methods, SSIIM2, k-ω turbulence model.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۱۰/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۲/۱۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

مقدمه

در بسیاری از تأسیسات هیدرولیکی تعیین ساختار جریان از کانال اصلی به کانال‌های جانبی از اهمیت بالایی برخوردار است. اکثر ایستگاه‌های پمپاژ رودخانه‌ای مشکل رسوب‌گذاری در دهانه‌ی آب‌گیری و حوضچه‌ی مکش را دارند که این مسأله باعث می‌شود که چندین بار در سال نیاز به رسوب‌زدایی داشته باشند که هزینه‌ی بهره‌برداری از این‌گونه ایستگاه‌ها را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. برای این منظور فراهم نمودن شرایطی با ویژگی‌های مناسب جهت جلوگیری از رسوب‌گذاری در دهانه‌ی آب‌گیر بسیار حائز اهمیت است. برخورد متقابل خطوط جریان منحرف شده با گرادیان عمودی سرعت، یک جریان گردابی به‌وجود می‌آورد که انتقال رسوبات، به‌خصوص رسوبات بار بستر به‌طرف آب‌گیر را تشدید می‌نماید. هر اقدامی که باعث کاهش جریان‌های ثانویه و گردابی در دهانه‌ی آب‌گیر شود، کاهش تجمع رسوب در دهانه‌ی آب‌گیر را در بر خواهد داشت. هم‌چنین توجه کافی نداشتن به طراحی مناسب تأسیسات کنترل رسوب در آب‌گیر می‌تواند مشکلاتی از قبیل کاهش ظرفیت انتقال جریان در کانال آب‌گیر در اثر ته‌نشینی رسوبات، آسیب دیدن تأسیسات انتقال و نیروگاهی، استهلاک پمپ‌ها و قطع آب جهت لای‌روبی کانال‌ها و تحمیل هزینه‌های اقتصادی لای‌روبی کانال‌ها را به‌دنبال داشته باشد. بنابراین بایستی حتی‌الامکان میزان رسوبات ورودی به آب‌گیر را با استفاده از سازه‌های انحراف و دفع رسوب، کاهش داد. یکی از روش‌های کاهش انتقال رسوب به آب‌گیرها استفاده از صفحات مستغرق است. تحقیقات مختلفی برای یافتن ابعاد، فواصل و زاویه‌ی برخورد با جریان و آرایش‌های مختلف نصب صفحات مستغرق صورت پذیرفته است و تحقیقات بیش‌تر در راستای شناخت و هم‌چنین افزایش کارآیی کنترل رسوب این صفحات هم‌چنان ادامه دارد. آب‌شکن‌ها نیز به‌عنوان سازه‌ی حفاظتی و هدایت جریان سابقه‌ی کاربرد طولانی در مهندسی رودخانه دارند. مطالعات زیادی بر روی آب‌گیری مستقیم از رودخانه‌ها، مشکلات رسوب‌گذاری و روش‌های کنترل رسوب ورودی به آب‌گیرها صورت گفته است. Nakato و همکاران [1] با ساخت مدل فیزیکی برای پنج دهانه آب‌گیر رودخانه‌ای با بستر ماسه‌ای به بررسی مشکلات ورود رسوبات بستر به دهانه‌ی آب‌گیر و روش‌های کاهش آن پرداختند. Neary و Odgaard [2] مطالعات آزمایشگاهی را بر روی هیدرولیک جریان در آب‌گیرهای ۹۰ درجه انجام دادند. Solaymani Osbooei [3] کاربرد صفحات مستغرق در مسیر مستقیم رودخانه‌ها و تأثیر آرایش و شکل صفحات بر تغییرات مرفولوژی بستر رودخانه را مطالعه نموده و نشان داده است که با افزایش دبی و سرعت جریان کارایی صفحات افزایش پیدا می‌کند. راه‌کارهای افزایش کارآیی صفحات مستغرق توسط Brakdoll و همکاران [4] مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های انجام شده توسط ایشان نشان داد که شدت رسوبات ورودی بستر به داخل آب‌گیر پس از نصب صفحات مستغرق زمانی می‌تواند ناچیز باشد که نسبت دبی واحد عرض آب‌گیر به دبی واحد عرض کانال اصلی، کم‌تر از حدود ۰/۲ باشد. Kuhnle و همکاران [5] نشان دادند که برای آب‌شکن‌هایی با زوایای ٤٥، ۹۰ و ۱۳۵ درجه با دو نسبت تنگ‌شدگی ۰/۱۲۵ و ۰/۲۵ در یک کانال آزمایشگاهی، کم‌ترین فرسایش بستر، در ناحیه‌ی نزدیک جداره به آب‌شکن با زاویه‌ی ۹۰ درجه و بزرگ‌ترین حجم آب شستگی به آب‌شکن با زاویه ۱۳۵ درجه تعلق دارد. آب‌شکن‌هایی که به سمت بالادست متمایل باشند، به‌طور معمول موجب انحنای بیش‌تری در جریان اصلی می‌شوند. Sajedi Sabegh و Habibi [6] تأثیر کاربرد با هم صفحات مستغرق و مجموعه‌ی آب‌شکن‌ها در افزایش راندمان آب‌گیری را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که در مواردی تا ۹۵ درصد ورود رسوبات به آب‌گیر کاهش یافته است.

حسـن پـور [۷] کـاربرد صـفحات مسـتغرق مرکـب و آستانه را تنها برای نسبت انحراف بسیار پـایین توصـیه کرده است. وی هم‌چنین نشان داده است که با افـزایش عدد فرود صفحات به‌تر عمل می‌کننـد. Ramamurthy و همکاران [8] مطالعه‌ی آزمایشگاهی در یک انشـعاب ۹۰ درجه و برای یک آب‌راهه روباز با مقطع مسـتطیلی انجـام دادنـد و از ابزارهـای دقیـق سـه‌بعـدی جهـت اندازه‌گیری سرعت در مقاطع مختلف استفاده نمودنـد. صفرزاده و صالحی نیشـابوری [۹] بـه بررسـی عـددی الگوی سه‌بعدی جریـان در آب‌گیـر جـانبی پرداختنـد. شاملو و پیرزاده [۱۰]، بـه بررسـی اثـرات پارامترهـای هندسی و هیدرولیکی بر ابعاد ناحیه‌ی جـدایی جریـان در آب‌گیرهای جانبی بـا اسـتفاده از نـرم‌افـزار Fluent پرداختند که مطابقت خوبی بین مقادیر حاصل و نتـایج آزمایشگاهی دیده شد. شاملو و اثنی عشـری [۱۱]، بـه بررســی عــددی هیــدرولیک و رســوب جریــان در آب‌گیرهای جانبی رودخانه‌ای بـا اسـتفاده از نـرم‌افـزار SSIIM2 پرداختنــد. ماهیــت رســوب جریــان در آب‌گیرهــای جــانبی شــناخته شــده و در کارهــای آزمایشگاهی و روش‌های عددی دیگر بدان اشاره شـده است.

در بخش فوق تأکید بر صحت‌سنجی شـبیه‌سـازی نتایج آزمایشگاهی به‌وسیله‌ی نرم‌افزار SSIIM2 و تأکید بر توانایی این نرم‌افزار در بازسازی همـان پدیـده‌هـای فیزیکی است که نتـایج آزمایشـگاهی آن‌هـا را پدیـدار نمـوده اسـت. در مطالعـات قبلـی در کنـار مطالعــه‌ی آزمایشـگاهی بــه بررسـی عــددی الگــوی ســه‌بعــدی رسـوب‌گـذاری در آب‌گیرهـای جـانبی رودخانـه‌ای خصوصاً با استفاده از سازه‌های انحراف و دفع رسـوب از جمله صفحات مستغرق و آب‌شکن پرداختـه نشـده بود. در این تحقیـق، بـرای بررسـی توانـایی نـرم‌افـزار SSIIM2 در پیش‌بینی نتایج رسوب جریان و روش‌های کنترل آن در آب‌گیرهای جانبی رودخانه‌ای، شبیه‌سازی عددی جریان رسوبی در آب‌گیری از مسیر مستقیم یک کانال مستطیلی به‌کمک این نرم‌افزار صـورت گرفتـه و با توجه به نتایج عددی حاصل، روابط ریاضی نیز ارائه گردیده شده است.

نرم‌افزار عددی و معادلات حاکم

نـرم‌افـزار SSIIM بـه‌منظـور شـبیه‌سـازی رسـوب در آب‌گیرها و برای مهندسی رسوب، هیـدرولیک، محـیط زیست و رودخانه طراحی شده است. این نرم‌افـزار بـر مبنای رویکرد حجم محدود با شبکه‌ی سازمان یافتـه‌ی سه‌بعدی طراحی شـده اسـت و در آن معـادلات نـاویر استوکس و معادلات انتقال و انتشار برای حمل رسوب با استفاده از روش حجم کنترل حل می‌شوند. هم‌چنین این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سـازی رسـوب‌شـویی توسـط روابـط مختلـف انتقـال رسـوب را دارا اسـت. تحلیـل جریان در حالت ماندگار صورت‌گرفتـه و از الگـوریتم SIMPLE برای کوپل سـرعت و فشـار اسـتفاده شـده است. نسخه‌ی مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق، نسـخه‌ی 1.0.0.1 تحـت وینـدوز نـرم افـزار SSIIM2 می‌باشد.

معــادلات حــاکم بــر حرکــت ســیال عبارتنــد از معادله‌ی پیوستگی و معادله‌ی مومنتوم که برای جریـان آشفته تراکم‌ناپذیر در یک هندسه‌ی سه‌بعدی به‌ترتیـب روابط (۲ و ۱) می‌باشند.

$$\overline{\frac{\partial Ui}{\partial xi}} = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial \overline{Ui}}{\partial t} + (\overline{Uj})\frac{\partial \overline{Ui}}{\partial xj} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{P}}{\partial xi} + g_{xi} + \frac{\partial}{\partial xj}[\nu\frac{\partial \overline{Ui}}{\partial xj} - \overline{U_i'U_j'}] \qquad (۲)$$

در روابـط فـوق، $\rho\overline{U_iU_j}$ تـنش رینولـدز، U_i و U_j به‌ترتیب سرعت جریـان در جهـات x و y، t زمـان، ν لزجت مولکولی، P فشار، k انرژی جنبشی آشفتگی، ρ چگـالی سـیال و g_{xi} شـتاب گرانشـی در جهـت x_i می‌باشند.

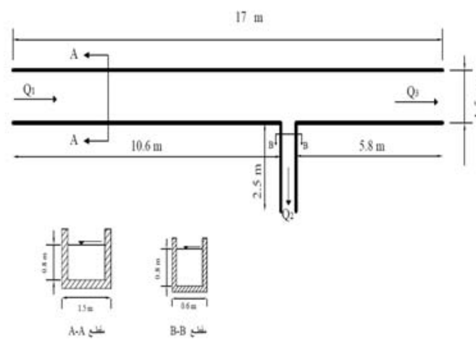
برای محاسبه‌ی بار معلق از معادله‌ی انتقال- پخش [12] به‌شرح ذیل استفاده می‌گردد:

$$\frac{\partial c}{\partial t}+Uj\frac{\partial c}{\partial Xi}+\omega\frac{\partial c}{\partial z}=\frac{\partial c}{\partial Xj}(\Gamma\frac{\partial c}{\partial Xj}) \quad (۳)$$

در رابطه‌ی (۳)، c غلظت رسوب، ω سرعت سقوط، U سرعت جریان، X بعد فاصله و Γ ضریب انتشار می‌باشد.

نتایج و بحث

مطالعه‌ی عددی جریان رسوبی مدل آزمایشگاهی مرجع [۱۳]. در این قسمت برای صحت‌سنجی نرم‌افزار SSIIM2 در پیش‌بینی رسوب ورودی به آب‌گیر، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف نسبت دبی آب‌گیری (R)، زاویه‌ی آب‌گیری (θ) و عدد فرود جریان ورودی (F_r) بر میزان رسوبات ورودی به کانال آب‌گیر، مدل آزمایشگاهی مرجع [۱۳] شبیه‌سازی گردیده است. در این مدل آزمایشگاهی، طول کانال اصلی ۱۷ متر و عرض آن ۱/۵ متر و عمق آن ۰/۸ متر بوده است. آب‌گیری توسط کانال جانبی به عرض ۰/٦ متر و طول ۲/۵ متر که با زاویه‌ی ۹۰ درجه نسبت به آن قرار گرفته، انجام شده است. در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، قطر متوسط رسوبات مصالح بستر ۱ میلی‌متر، ضخامت لایه‌ی بستر ۲۰ سانتی‌متر، شیب بستر ۰/۰۰۱۵ و غلظت ورودی به کانال kg/m^3 ۰/۲٦۵ در نظر گرفته شده است. شماتیک کانال مزبور در شکل (۱) نشان داده شده است



شکل ۱ مشخصات هندسی فلوم آزمایشگاهی مرجع [۱۳]

از سرعت میانگین در ورودی کانال اصلی به‌عنوان شرط مرزی سرعت معین استفاده شده است. با توجه به تغییرات ناچیز سطح آب، شرط مرزی تقارن به سطح آب اعمال شده است. شرط مرزی دیواره برای مرزهای صلب میدان اعمال شده و دیواره‌ها از لحاظ هیدرولیکی صاف در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به نتایج مثبت حاصل از مطالعات قبلی، مدل آشفتگی k-ω در این مطالعه استفاده شده است. یکی از پارامترهای مهم در سرعت اجرای مدل، شبکه‌بندی مناسب منطقه‌ای می‌باشد که جریان در آن برقرار است. در این مدل‌سازی، پس از امتحان مقادیر مختلف و تست حساسیت نسبت به ابعاد شبکه، ابعاد سلول‌های شبکه‌ی کانال اصلی ۸/۵×۸×٦/۵ سانتی‌متر و ابعاد سلول‌های شبکه‌ی کانال آب‌گیر ٦/۵×٦/۵×۸/۵ سانتی‌متر به‌عنوان شبکه‌ی بهینه انتخاب شد. از آن‌جا که تعداد متغیرهای مؤثر بر رسوب ورودی به آب‌گیر زیاد می‌باشد به‌منظور ارائه‌ی رابطه‌ی مشخص ریاضی برای تحلیل مسأله، ابتدا جهت آنالیز ابعادی رابطه‌ی کلی ذیل استخراج می‌گردد.

$$Q_{si}=F(Q_{sm},Q_M,Q_I,Fr,\theta,b,B,S,\rho,\rho_s,N,\delta_s,\delta_n,L_D,L_I) \quad (٤)$$

که در این رابطه، دبی رسوب ورودی به آب‌گیر(Q_{si})، حجم رسوبات ته‌نشین شده در کانال آب‌گیر(V_{si})، دبی رسوب کانال اصلی (Q_{sm})، دبی جریان در کانال اصلی (Q_M)، دبی جریان در کانال آب‌گیر (Q_I)، عدد فرود جریان ورودی (F_r)، زاویه‌ی آب‌گیری (θ)، عرض کانال آب‌گیر (b)، عرض کانال اصلی (B)، شیب کانال اصلی (S)، جرم حجمی سیال (ρ)، جرم حجمی رسوبات (ρ_s)، تعداد ردیف صفحات مستغرق (N)، فاصله‌ی طولی صفحات مستغرق (δ_s)، فاصله‌ی عرضی صفحات مستغرق (δ_n)، طول آب‌شکن (L_D) و فاصله‌ی آب‌شکن تا خط مرکزی آب‌گیر (L_I) می‌باشد.

با استفاده از آنالیز ابعادی، رابطه‌ی (۵) به‌دست می‌آید:

$$\frac{Q_{si}}{Q_{sm}} = F(\frac{Q_M}{Q_I}, Fr, \theta, \frac{b}{B}, \frac{\rho_s}{\rho}, S, N, \frac{\delta_s}{\delta_n}, \frac{L_D}{B}, \frac{L_I}{b}) \quad (۵)$$

با توجه به این‌که در مطالعه‌ی آزمایشگاهی مرجع [۱۳] از صفحات مستغرق و آب‌شکن استفاده نشده است، بنابراین در این قسمت پارامترهای بی‌بعد N، δ_s/δ_n، L_D/B و L_I/b از رابطه‌ی (۵) حذف گردیده و رابطه‌ی (٦) به‌دست می‌آید.

$$\frac{Q_{si}}{Q_{sm}} = F(\frac{Q_M}{Q_I}, Fr, \theta, \frac{b}{B}, \frac{\rho_s}{\rho}, S) \quad (٦)$$

شیب کانال اصلی، عرض کانال اصلی و آب‌گیر و دبی جریان در کانال اصلی ثابت می‌باشد، بنابراین پارامترهای S، ρ_s/ρ و b/B از بین متغیرهای بدون بعد حذف می‌شوند. در نهایت اعداد بی‌بعد زیر برای بررسی اثرات متغیرها بر میزان ورود رسوبات به آب‌گیر در نظر گرفته شده است:

$$Q_{sr} = F(R, Fr, \theta) \quad (۷)$$

که در این رابطه، Q_{sr} نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر (Q_{si}/Q_{sm})، R نسبت دبی آب‌گیری (Q_M/Q_I) می‌باشند. ابتدا به بررسی تأثیر تغییرات R و θ بر Q_{sr} پرداخته شده است.

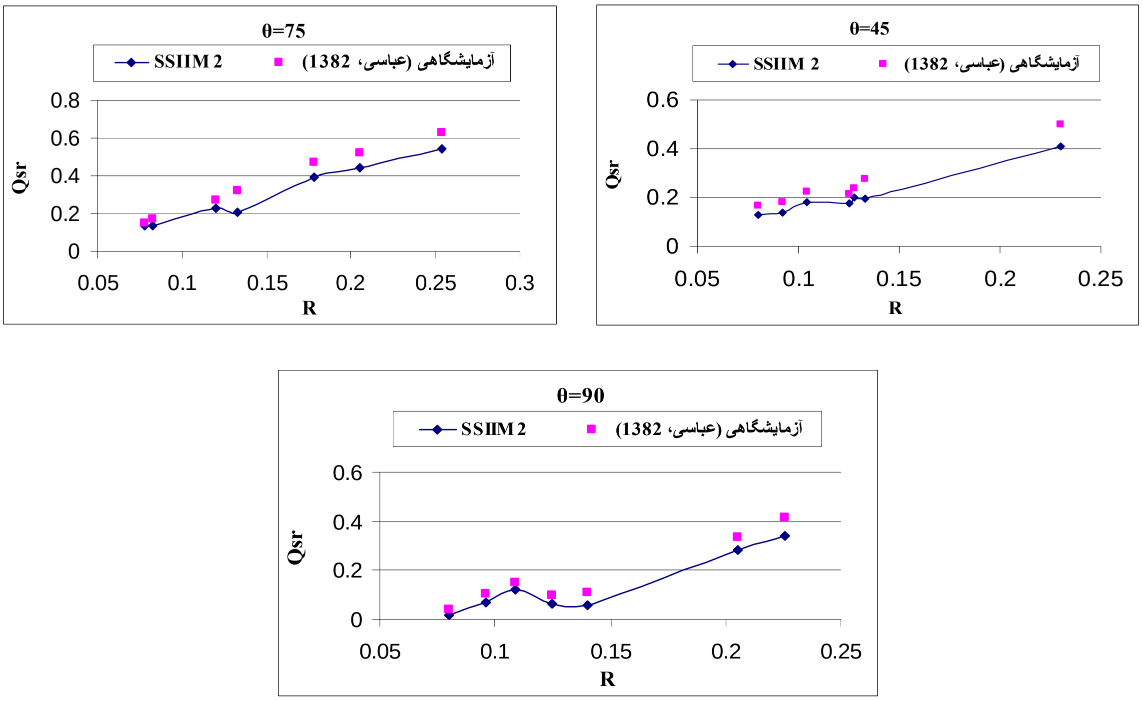
شکل (۲)، مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی تأثیرات R بر Qsr در زوایای مختلف آب‌گیری ٤۵، ۷۵ و۹۰ درجه را به‌ازای دبی ثابت ورودی (Q_M) ۷۸ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ثابت جریان ورودی ۰/٤ نشان می‌دهد.

بررسی نتایج حاصل از شکل (۲) نشان می‌دهد همان‌طور که انتظار می‌رود در انطباق با نتایج مرجع [٤]، با افزایش نسبت آب‌گیری، نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از شکل (۲)، درصد خطای میانگین حاصل از مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی در زاویه آب‌گیری ۹۰ درجه ۱۲/۱۵٪ و در زاویه آب‌گیری ۷۵ درجه میانگین خطا ۱٦/۰۵٪ و در زاویه آب‌گیری ٤۵ درجه میانگین خطا ۱۹/۸۱٪ می‌باشد. شکل (۳) تأثیر اعداد فرود ۰/۳۲ الی ۰/٤۸ را در زوایای مختلف آب‌گیری ٤۵، ۷۵ درجه بر نسبت رسوب ورودی به‌ازای نسبت ثابت توزیع دبی ۰/۲ نشان می‌دهد.

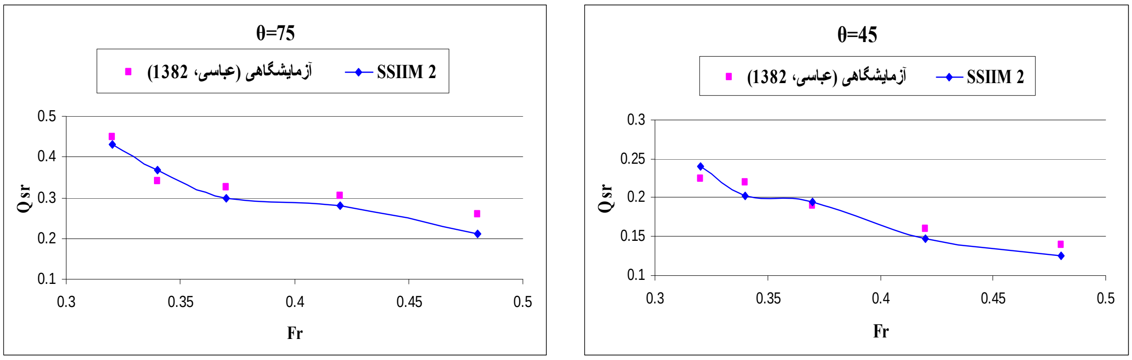
با توجه به شکل (۳)، با افزایش عدد فرود جریان در یک نسبت آب‌گیری ثابت، مؤلفه‌ی عرضی سرعت در جلوی دهانه‌ی آب‌گیر کاهش و مؤلفه‌ی طولی سرعت افزایش می‌یابد، در نتیجه رسوبات به پایین منتقل و رسوبات کم‌تری وارد دهانه‌ی آب‌گیر می‌شوند. حداقل، حداکثر و میانگین خطای حاصل در زاویه‌ی آب‌گیری ٤۵ درجه به‌ترتیب ۲/۵٦٪، ۹/۵۰٪ و ٦/۰۱٪ و در زاویه‌ی آب‌گیری ۷۵ درجه ٤/٤٤٪، ۱۹/۲۳٪ و ۹/۲۳٪ به‌دست آمد. بر اساس رابطه‌ی (۷) و با احتساب نتایج حاصل از شکل (۳ و ۲)، رابطه‌ی (۸) برای تعیین نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر به‌دست می‌آید:

$$Q_{sr} = R^{0.95}\theta^{0.11}.Fr^{-0.42} \qquad r^2 = 0.815 \quad (۸)$$

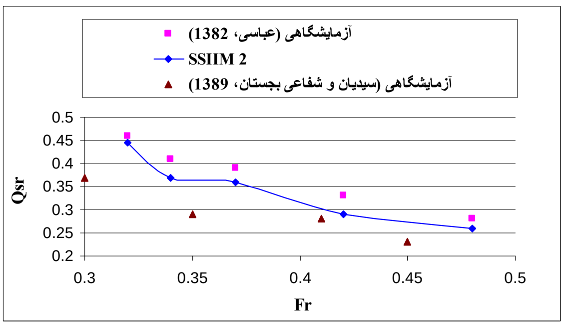
تغییرات نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر بر حسب اعداد مختلف فرود جریان در زاویه‌ی آب‌گیری ثابت ۹۰ درجه با نتایج آزمایشگاهی مرجع [١٤] نیز در شکل (٤) مقایسه شده است. در مطالعه‌ی آزمایشگاهی آنان، طول کانال اصلی ۸ متر، عرض آن ۰/۲۵ متر و عمق جریان ۰/۱۰ متر است و آب‌گیری توسط کانال جانبی به عرض ۰/۲ متر و طول ۲/۲۵ متر که با زاویه‌ی ۹۰ درجه نسبت به آن قرار گرفته، انجام شده است. شیب کف کانال‌های اصلی و آب‌گیر صفر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ تغییرات نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر بر حسب نسبت دبی آب‌گیری در زوایای مختلف آب‌گیری ٤٥، ٧٥ و ٩٠ درجه



شکل ۳ تغییرات نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر بر حسب اعداد مختلف فرود جریان در زوایای مختلف آب‌گیری



شکل ٤ تغییرات نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر بر حسب عدد فرود جریان در تحقیق حاضر با سایر محققان

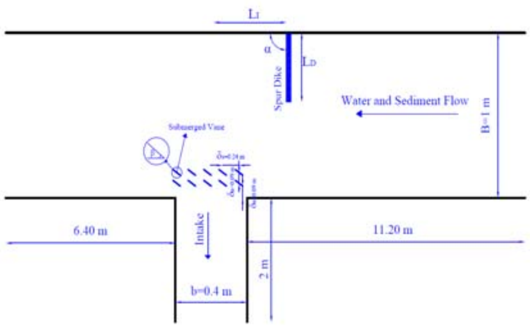
[١٤]

همان‌طورکه در شکل (٤) مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از تحقیق حاضر مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [١٤] دارد و در آن به‌ازای زاویه‌ی آب‌گیری ثابت، با افزایش عدد فرود جریان ورودی، نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر کاهش می‌یابد. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از بررسی عددی مطالعات آزمایشگاهی مراجع [١٤ و ١٣] و جمع‌بندی نتایج آن‌ها، رابطه‌ی کلی (۹) پیشنهاد می‌گردد. در مطالعه‌ی آزمایشگاهی [١٤] پارامترهای R و θ ثابت فرض شده بودند.

$$Q_{sr} = R^{0.795}\theta^{0.352} . Fr^{-0.296} \qquad r^2 = 0.785 \qquad (۹)$$

در بخش دوم این مطالعه، برای کنترل و کاهش میزان رسوبات ورودی به آب‌گیر، از سازه‌های انحراف و دفع رسوب از جمله صفحات مستغرق و آب‌شکن استفاده شده و تأثیر آن‌ها بر کاهش میزان رسوب ورودی مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعه‌ی عددی روش‌های کنترل رسوب با استفاده از مدل آزمایشگاهی. گوهری و همکاران [١٥] در این مدل آزمایشگاهی، طول کانال اصلی ١٨ متر، عرض آن ١ متر و عمق آن ١ متر بوده است. آب‌گیری توسط کانال جانبی به عرض ٠/٤ متر و طول ٢ متر که در١١/٢ متری پایین‌دست ورودی کانال اصلی و با زاویه‌ی ٩٠ درجه نسبت به آن قرار دارد انجام شده است. دبی جریان ورودی ثابت و برابر ٠/٠٥٦ مترمکعب بر ثانیه، قطر ذره رسوب ١ میلی‌متر، شیب کانال ٠/٠٠٢، مدت زمان آزمایش ٤ ساعت، چگالی ذرات رسوبی برابر ٢/٦٥ گرم بر سانتی‌مترمکعب و عمق رسوبات در کلیه‌ی آزمایش‌ها ثابت و برابر ٢٠ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله‌ی طولی صفحات از هم (δ_s) ٢٤ سانتی‌متر، فاصله‌ی عرضی آن‌ها (δ_n) ٩ سانتی‌متر و زاویه‌ی صفحات (β) ٤٥ درجه می‌باشد. طول آب‌شکن‌های(L_D) به‌کار رفته ١٥، ٢٠ و ٢٥ سانتی‌متر بوده است. آب‌شکن در سه موقعیت مختلف: مقابل آب‌گیر، ٤٠ سانتی‌متر بالاتر از آب‌گیر (L_I) و ٨٠ سانتی‌متر بالاتر از آب‌گیر ($2L_I$) به‌کار رفته که زوایای به‌کار رفته برای آب‌شکن ٤٥ درجه، ٩٠ درجه و ١٣٥ درجه بوده است. مشخصات هندسی فلوم آزمایشگاهی در شکل (٥) نشان داده شده است.



شکل ٥ مشخصات هندسی فلوم آزمایشگاهی [١٥]

در این مدل‌سازی، پس از امتحان مقادیر مختلف و تست حساسیت نسبت به ابعاد شبکه‌ی مورد نظر، ابعاد سلول‌های شبکه‌ی کانال اصلی در قبل و بعد از آب‌گیر به‌ترتیب ١٠×١٠×١٢ و ١٠×٢٠×٩ سانتی‌متر، در محدوده‌ی آب‌گیر ١٠×١٠×٢ سانتی‌متر و ابعاد سلول‌های شبکه‌ی کانال آب‌گیر ١٠×٧×٢ سانتی‌متر به‌عنوان شبکه‌ی بهینه انتخاب شد.

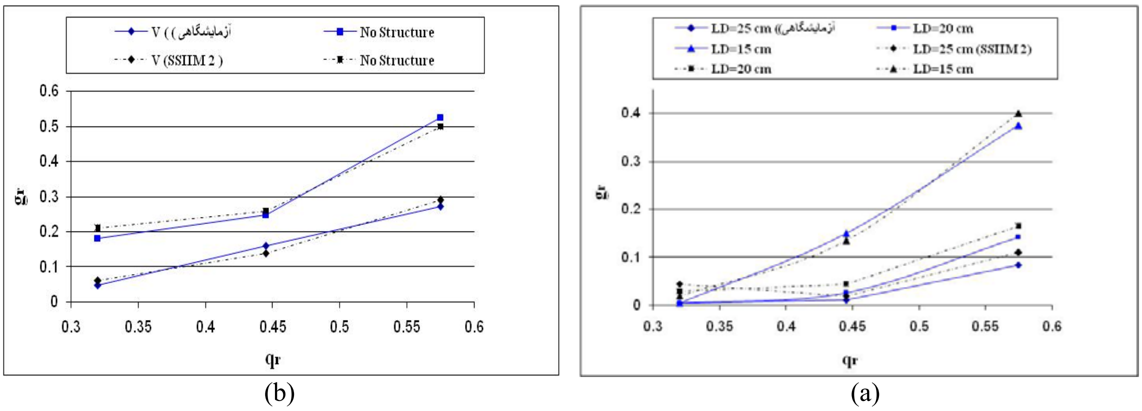
شکل و ابعاد کانال اصلی و کانال آب‌گیر، شیب کانال اصلی، دبی جریان در کانال اصلی، زاویه ی آب‌گیری، ابعاد وآرایش صفحات مستغرق، زاویه‌ی آب‌شکن با جریان اصلی و دانه‌بندی مصالح بستر در این آزمایش ثابت است. هم‌چنین به‌علت این‌که عدد رینولدز جریان در محدوده‌ی جریان‌های آشفته قرار دارد (Re=60000) اثر لزجت در مقابل اینرسی قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. با توجه به یکسان بودن شرایط هیدرولیکی کانال بالادست، عدد Fr نیز در این مطالعه ثابت بوده و در نهایت بر اساس رابطه‌ی (٥) و حذف پارامترهای ذکر شده، اعداد بی‌بعد زیر برای بررسی اثرات متغیرها بر میزان ورود رسوبات به آب‌گیر در نظر گرفته شده است:

$$g_r = F(q_r, \frac{L_D}{B}, \frac{L_I}{b}) \quad (۱۰)$$

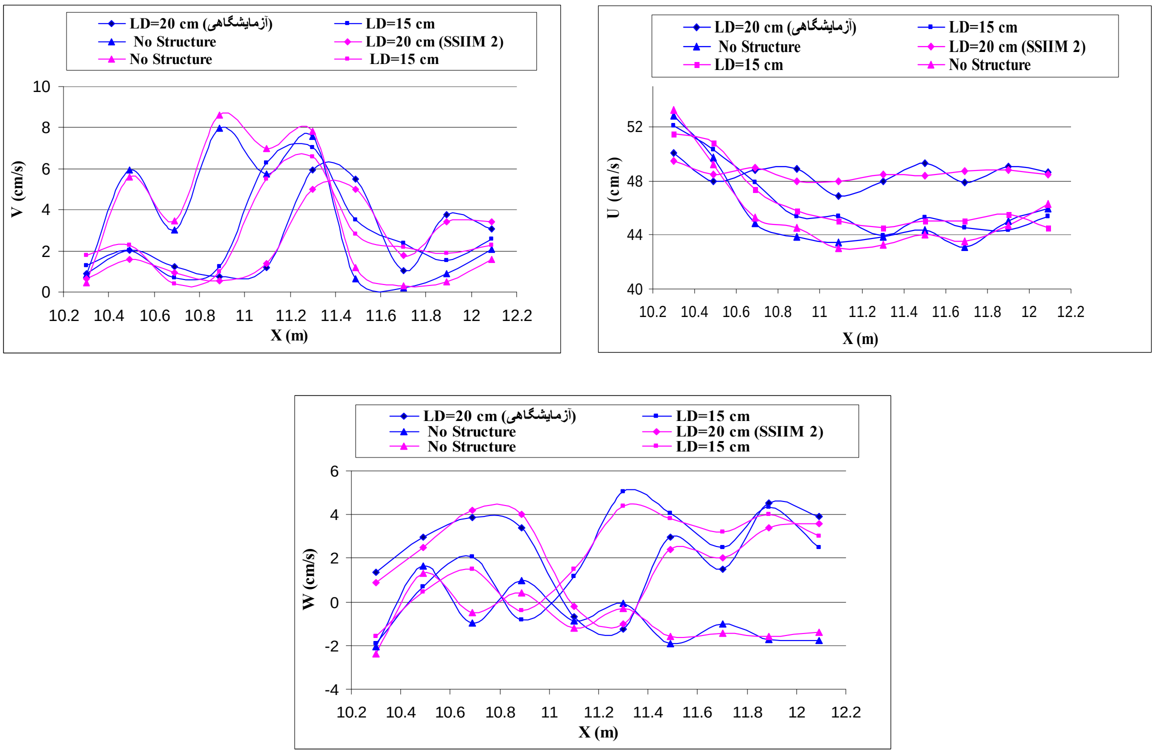
$$V_r = F(q_r, \frac{L_D}{B}) \quad (۱۱)$$

که در این روابط، g_r نسبت رسوبات خروجی از کانال آب‌گیر به رسوبات ورودی به کانال اصلی (Q_{sr})، V_r نسبت حجم رسوبات ته‌نشین شده در کانال آب‌گیر به حجم رسوبات ورودی به کانال اصلی (V_{si}/V_{sm})، L_D/B طول نسبی آب‌شکن، q_r نسبت دبی آب‌گیری و L_I/b فاصله‌ی نسبی آب‌شکن از خط مرکزی کانال آب‌گیر می‌باشند. ابتدا تأثیر طول‌های مختلف آب‌شکن (L_D) به‌ازای نسبت‌های مختلف دبی آب‌گیری (q_r) در حالت استفاده از آب‌شکن بدون صفحه‌ی مستغرق، با وجود صفحه و بدون استفاده از آب‌شکن (V) و هم‌چنین بدون استفاده از صفحه و آب‌شکن (No structure) بر نسبت رسوبات ورودی به آب‌گیر جانبی (g_r) مورد بررسی قرار گرفت. شکل (٦) تأثیر طول‌های مختلف آب‌شکن ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر و حالت‌های مختلف وجود و عدم وجود صفحات مستغرق را بر میزان رسوبات ورودی به آب‌گیر به‌ازای نسبت‌های مختلف دبی نشان می‌دهد.

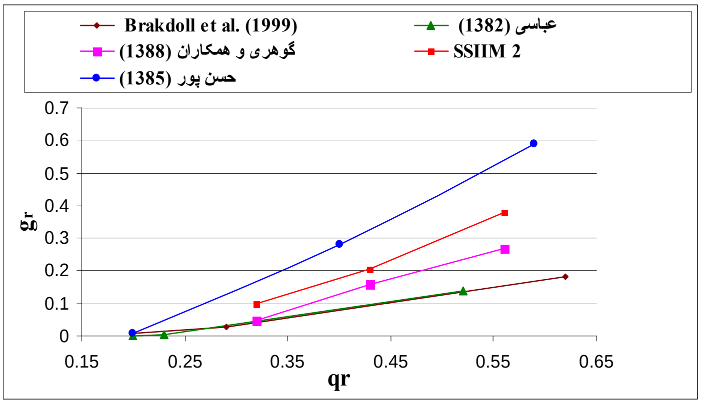
همان‌طور که در شکل (٦–a) مشاهده می‌شود، با افزایش طول آب‌شکن مقدار ورود رسوبات به آب‌گیر کاهش می‌یابد. هنگامی‌که طول آب‌شکن ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد، تأثیر آن در میزان رسوب ورودی کم‌تر است [۱۵]. با افزایش نسبت دبی انحرافی از ۰/۴۵ الی ۰/۵۷، مقدار رسوبات ورودی به آب‌گیر به‌دلیل افزایش سرعت در آب‌گیر در حین ثابت بودن عمق جریان و افزایش شدت حمل رسوبات در کانال آب‌گیر، بیش‌تر می‌شود. در شکل (۷) متوسط سرعت‌های طولی (U)، عرضی (V) و عمقی جریان (W) در کانال اصلی و در محدوده‌ی آب‌گیر نشان داده شده است. سرعت جریان در ۰/٦ عمق جریان (مطابق مطالعه‌ی آزمایشگاهی) می‌باشد. با توجه به شکل (۷)، با افزایش طول آب‌شکن متوسط سرعت طولی و عمقی جریان افزایش یافته درحالی‌که در حالت عدم استفاده از آب‌شکن و صفحات مستغرق متوسط سرعت طولی و عمقی کاهش می‌یابد. حداقل، میانگین و حداکثر خطای حاصل از مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی در طول آب‌شکن ۱۵ سانتی‌متر برای محاسبه‌ی سرعت طولی به ترتیب ۱/۱۱٪، ۳/۸٦٪ و ۵/۲۵٪ ، برای محاسبه سرعت عرضی به‌ترتیب ۷/۹۱٪، ۱۱/۳۵٪ و ۱٤/۰٦٪ است و برای محاسبه‌ی سرعت عمقی به ترتیب ٦/۹۷٪، ۱٤/۹۵٪ و ۱۸/٦۷٪ می‌باشد. کارآیی صفحات مستغرق بدون آب‌شکن در کنترل رسوب با نتایج سایر محققان نیز در شکل (۸) مقایسه شده است.



شکل ٦ تأثیر طول آب‌شکن (a) و حالت‌های مختلف وجود و عدم وجود صفحات مستغرق (b) بر شدت رسوبات ورودی به آب‌گیر



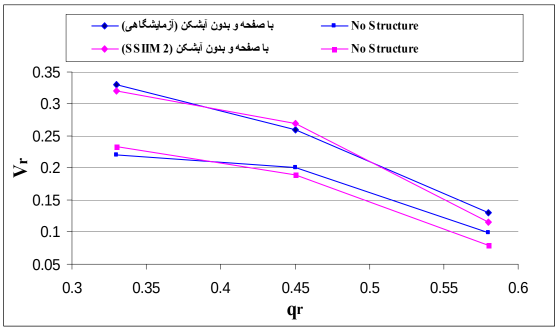
شکل ۷ تغییرات سرعت جریان برای طول‌های مختلف آب‌شکن (L_l=40cm، q_r=0.3، α=90) و وجود صفحات مستغرق



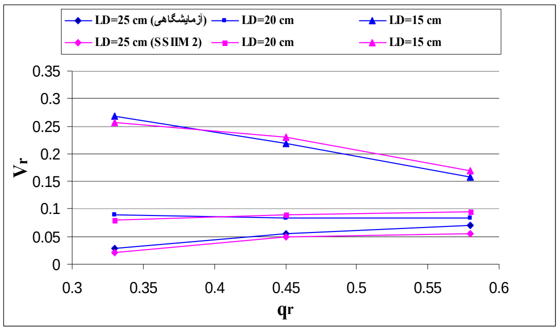
شکل ۸ مقایسه‌ی تغییرات نسبت انحراف رسوب با نسبت انحراف جریان در تحقیق حاضر و سایر محققان

همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود روند کلی تغییرات رسوبی خروجی از آب‌گیر با افزایش دبی آب‌گیری یکسان است و در همه‌ی آن‌ها با افزایش نسبت دبی آب‌گیری، مؤلفه‌ی عرضی سرعت در جلوی دهانه‌ی آب‌گیر افزایش می‌یابد و در نتیجه نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر نیز افزایش می‌یابد. میزان اختلاف نتایج عددی در مقایسه با نتایج سایر محققان، به‌دلیل متفاوت بودن پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی می‌باشد. با توجه به شکل (۹- a)، در حالت استفاده از صفحات مستغرق، مقدار ورود رسوبات به آب‌گیر به‌طور متوسط ۳۰٪ کاهش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به شکل (۹-b)، با افزایش طول آب‌شکن از ۱۵ سانتی‌متر به ۲۰ سانتی‌متر، مقدار ورود رسوبات به آب‌گیر به‌طور متوسط ٤٤٪ کاهش یافت. در نسبت آب‌گیری ۰/۵۷ نیز با افزایش طول آب‌شکن مقدار انباشت رسوبات در داخل آب‌گیر کاهش می یابد

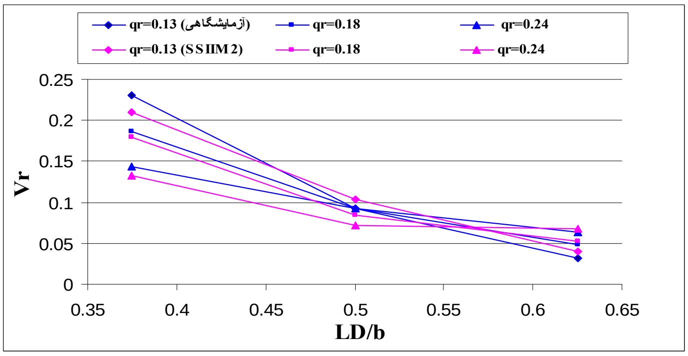
که نشان می‌دهد با افزایش طول آب‌شکن مقدار سرعت جریان در آب‌گیر بیش‌تر می‌شود و ورود رسوبات به آب‌گیر نیز کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۹-b)، حداقل، میانگین و حداکثر خطای حاصل از مقایسه در طول آب‌شکن ۱۵ سانتی‌متر به‌ترتیب ۳/۸۴٪، ۴/۶۵٪ و ۵/۸۸٪ است و با توجه به شکل (۹-a) حداقل، میانگین و حداکثر خطای حاصل در حالت عدم استفاده از صفحات مستغرق و آب‌شکن به ترتیب ۴/۳۴٪، ۵/۹۴٪ و ۸/۵۶٪ می‌باشد.



(a)

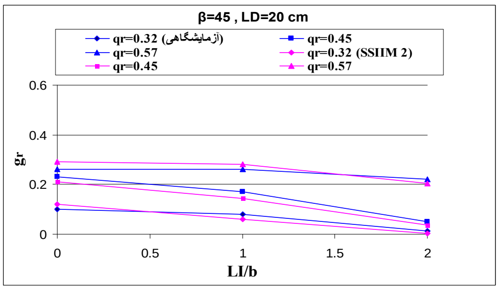


(b)

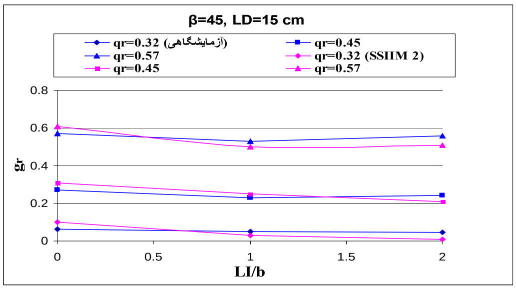


(c)

شکل ۹ تغییرات متوسط حجم نسبی رسوب در آب‌گیر با (b , a) دبی انحرافی، (c) طول نسبی آب‌شکن

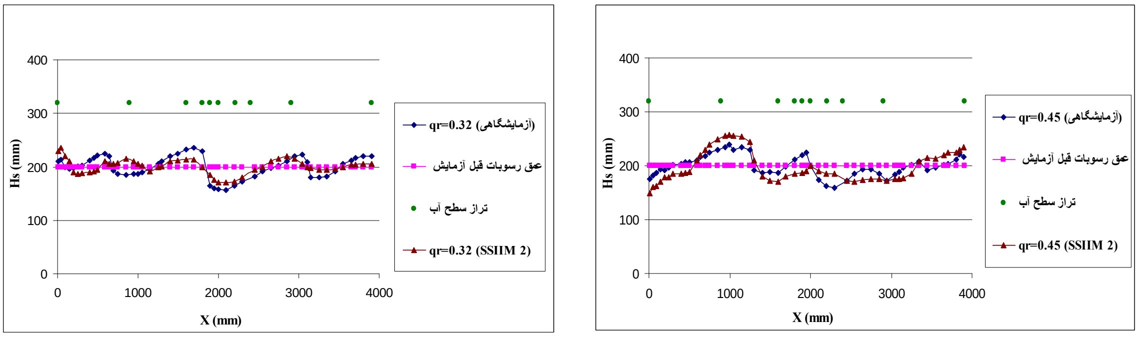


(a)



(b)

شکل ۱۰ تأثیر فاصله‌ی نسبی آب‌شکن (a، b و c) و طول نسبی آب‌شکن (d) بر نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر



شکل ۱۱ پروفیل بار بستر قبل از شروع آزمایش‌ها و پس از رسیدن به تعادل به‌ازای نسبت‌های دبی آب‌گیری ۰/۳۲ و ۰/٤٥

همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود روند کلی تغییرات رسوبی خروجی از آب‌گیر با افزایش دبی آب‌گیری یکسان است و در همه‌ی آن‌ها با افزایش نسبت دبی آب‌گیری، مؤلفه‌ی عرضی سرعت در جلوی دهانه‌ی آب‌گیر افزایش می‌یابد و در نتیجه نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر نیز افزایش می‌یابد. میزان اختلاف نتایج عددی در مقایسه با نتایج سایر محققان، به‌دلیل متفاوت بودن پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی می‌باشد. با توجه به شکل (۹- a)، در حالت استفاده از صفحات مستغرق، مقدار ورود رسوبات به آب‌گیر به‌طور متوسط ۳۰٪ کاهش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به شکل (۹-b)، با افزایش طول آب‌شکن از ۱۵ سانتی‌متر به ۲۰ سانتی‌متر، مقدار ورود رسوبات به آب‌گیر به‌طور متوسط ٤٤٪ کاهش یافت. در نسبت آب‌گیری ۰/٥۷ نیز با افزایش طول آبشکن مقدار انباشت رسوبات در داخل آب‌گیر کاهش یافت که نشان می‌دهد با افزایش طول آب‌شکن مقدار سرعت جریان در آب‌گیر بیش‌تر می‌شود و ورود رسوبات به آب‌گیر نیز کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۹-b)، حداقل، میانگین و حداکثر خطای حاصل از مقایسه در طول آب‌شکن ۱۵ سانتی‌متر به‌ترتیب ۳/۸٤٪، ٤/٦٥٪ و٥/۸۸٪ است و با توجه به شکل (۹-a) حداقل، میانگین و حداکثر خطای حاصل در حالت عدم استفاده از صفحات مستغرق و آب‌شکن به‌ترتیب ٤/۳٤٪، ٥/۹٤٪ و۸/٥٦٪ می باشد هم‌چنین با توجه به شکل (۹-c)، حداقل، میانگین و حداکثر خطای حاصل در q_r=0.13 به‌ترتیب ۸/٦۹٪، ۱۰/۰۱٪ و۱۱/۸۲٪، در q_r=0.18 به‌ترتیب ۳/۷٤٪، ۱۱/۱۱٪ و۱٥/۱۷٪ و در q_r=0.24 به‌ترتیب ٥/۸۸٪، ۱۱/٦۲٪ و۱۸/۲۳٪ به‌دست آمد. بر اساس رابطه‌ی (۱۱) و با احتساب نتایج آزمایشگاهی [۱٥] حاصل از شکل (۹)، رابطه‌ی (۱۲) برای تعیین حجم نسبی رسوب در آب‌گیر بر حسب نسبت دبی انحرافی و طول نسبی آب‌شکن پیشنهاد می‌گردد.

$$V_r = 0.493 + 0.357qr - 1.107(\frac{L_D}{B}) \qquad r^2 = 0.905 \qquad (۱۲)$$

در شکل (۱۰)، تأثیر فاصله‌ی نسبی قرارگیری آب‌شکن از آب‌گیر(L_l/b) در طول‌های مختلف آب‌شکن ۱٥ سانتی‌متر (a) و ۲۰ سانتی‌متر (b) بر نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر (g_r) مورد بررسی قرار گرفته‌است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم با نصب آب‌شکن در مقابل آب‌گیر مقدار رسوبات ورودی به آب‌گیر کاهش یافته است. این امر به‌دلیل افزایش سرعت عرضی در مقابل جریان است (شکل۳). با افزایش طول نسبی آب‌شکن (d)، کاهش نسبی سرعت عرضی جریان و افزایش متوسط سرعت طولی از ورود رسوبات به آب‌گیر کاسته می‌شود. زاویه‌ی قرارگیری صفحات مستغرق (β)، مطابق مطالعه‌ی آزمایشگاهی ٤٥ درجه در نظر گرفته شده است.

حداقل، میانگین و حداکثر خطای حاصل از مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی در q_r=0.32 با

توجه به شکل (۱۰-a)، به‌ترتیب ۹/۰۹٪، ۱۲/٥٤٪ و۱٦/٦۷٪ ، با توجه به شکل (۱۰-b) به‌ترتیب ۱۱/۲٥٪، ۱٦/٤٤٪ و ۲٥/۰۲٪ و با توجه به شکل (۱۰-c) به‌ترتیب ۸/۱۸٪، ۱۳/۰۷٪ و۱۹/۲۲٪ می‌باشند. هم‌چنین حداقل، میانگین و حداکثر خطای حاصل در q_r=0.32 با توجه به شکل (۱۰-d)، به‌ترتیب ٦/۱۳٪، ۱۰/٦٥٪ و۱۳/۳۳٪ به‌دست آمد.

برای نشان دادن تأثیر نسبت دبی آب‌گیری (q_r)، طول آب‌شکن (L_D)، فاصله‌ی قرارگیری آب‌شکن از دهانه‌ی آب‌گیر(L_I)، عرض آب‌گیر(b) و کانال اصلی (B) بر میزان رسوبات ورودی به داخل آب‌گیر(g_r)، با توجه به آنالیز ابعادی، تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی شکل (۱۰) و بر اساس رابطه‌ی (۱۰)، رابطه‌ی نهایی به‌شرح زیر استخراج گردید. مقدار میانگین مربعات (r^2) مربوط به رابطه در کنار آن نوشته شده است.

شکل (۱۱) پروفیل بار بستر را پس از رسیدن به تعادل نسبی در دو حالت آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد .با توجه به شکل (۱۱)، متوسط عمق رسوبات تەنشین شده در بستر در حالت آزمایشگاهی بەازای نسبت‌های دبی آب‌گیری ۰/۳۲ و ۰/٤٥ به ترتیب برابر ۱۹۹/۲ و ۲۰۲ میلی‌متر است در حالی‌که این مقادیر در حالت عددی به‌ترتیب برابر ۲۰۳/٦ و ۱۹۹/۸ میلی‌متر به‌دست آمد. عمق رسوبات قبل از کلیه‌ی آزمایش‌ها برابر ۲۰۰ میلی‌متر بوده است.

نتیجه‌گیری

در مجموع نتایج حاصل برای جریان‌هایی با شرایط اعمال شده در این تحقیق عبارتنداز:

- افزایش نسبت آب‌گیری باعث می‌شود که بخش بیش‌تری از جریان عبوری از کانال اصلی وارد کانال آب‌گیر شود و مؤلفه‌ی عرضی سرعت در جلوی دهانه‌ی آب‌گیر با افزایش نسبت آب‌گیری افزایش یافته و در نتیجه رسوبات بیش‌تری وارد کانال آب‌گیر می‌شود.

- در یک نسبت ثابت آب‌گیری، با افزایش زاویه آب‌گیری نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر افزایش می‌یابد.

$$g_r = 0.335 + 0.927qr - 1.125(\frac{L_D}{B}) - 0.041(\frac{L_I}{b})r^2 = 0.850 \qquad (۱۳)$$

- با نصب آب‌شکن در بالاتر از آب‌گیر (به‌سمت ورودی کانال اصلی) و افزایش L_I/b، سطح رسوبات در مقابل آب‌گیر به‌دلیل افزایش سرعت جریان، پایین‌تر می‌رود و با این عمل، آستانه‌ای در مقابل آب‌گیر ایجاد می‌شود که مانع ورود رسوبات به داخل آبگیر خواهد شد.

-متوسط تراز بستر پس از رسیدن به تعادل با تغییر دبی آب‌گیری نیز تقریباً ثابت می ماند و مجموع رسوبات وارد شده به محدوده‌ی آب‌گیر و رسوبات خارج شده از محدوده آب‌گیر تقریباً ثابت است. هم‌چنین متوسط عمق رسوبات تەنشین شده در بستر در حالت عددی به‌ترتیب برابر ۲۰۳/٦ و ۱۹۹/۸ میلی‌متر به‌دست آمد.

- بر اساس آنالیز ابعادی، نسبت رسوب ورودی به آب‌گیر به‌طول نسبی، فاصله‌ی نسبی قرارگیری آب‌شکن از دهانه‌ی آب‌گیر و نسبت دبی آب‌گیری بستگی دارد. هم‌چنین بر اساس آنالیز ابعادی، رابطه‌ای برای تعیین حجم نسبی رسوب ورودی به آب‌گیر استخراج گردید.

مراجع

1. Nakato, T. et al., "A Hydraulic Model Study: Design of Sediment-Control Devices for the Intakes near River", IIHR Limited Distribution Rep. No. 194, Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa City, Iowa, (1992).

2. Neary, V.S. and Odgaard, A.J., "Three-Dimensional Flow Structure at Open Channel Diversions", J. Hydr. Engrg, ASCE, 119(11), pp. 1224–1230, (1993).
3. Solaymani Osbooei, H.R.., "Investigation of Submerged Vane Array on Rivers bed Morphology", M.Sc. Thesis in Environmental Engineering, Tehran Univ. 175p. (1996), (In Persian).
4. Brakdoll et al., "Sediment Control at Lateral Diversions: Limits and Enhancements to Vane Use", J.HYDR.Eng.ASCE, 129(2), pp. 83-87, (1999).
5. Kuhnle, R.A., Alonso, C.V., and Shields, F.D.Jr. "Geometry of Scour Holes Associated with 90° Spur Dikes", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,125:9.pp.972-978, (1999).
6. Sajedi Sabegh, M. and Habibi, M., "Laboratory Investigation of Using Submerged Vane and Dikes on Efficiency of Intakes", Proceeding of 4th hydraulic conference, pp. 35-42, (2003).
۷. حسن‌پور، فرزاد.، «کاربرد صفحات مستغرق مرکب و آستانه در آب‌گیرهای جانبی»، رساله‌ی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی عمران صفحه‌ی ۲۲۷، (۱۳۸۵).
8. Ramamurthy A.S., Junying Qu and Diep VO., "Numerical and Experimental Study of Dividing Open-Channels Flows", Journal of Hydraulic Engineering, Vol.133, No.10, 2007, pp.1135-1144, (2007).
۹. صفرزاده، اکبر و صالحی نیشابوری، علی اکبر.، «مدل‌سازی عددی الگوی سه‌بعدی جریان در آب‌گیر جانبی»، اولین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران، (۱۳۸۳).
۱۰. شاملو، حمید و پیرزاده، بهاره، «بررسی اثرات پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان در آب‌گیرهای جانبی با استفاده از نرم‌افزار Fluent»، نشریه تخصصی مهندسی عمران- نقشه برداری، (۱۳۸۹).
۱۱. شاملو، حمید و اثنی‌عشری، عادل، «بررسی عددی هیدرولیک جریان و رسوب در آب‌گیرهای جانبی رودخانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار SSIIM2»، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۹).
12. Olsen, N.B.R, "Three-Dimensional Numerical Model for Simulation of Sediment Movements in Water Intakes with Moltiblock Option", Department of hydraulic and environmental engineering, the Norwegian university of science and technology, (2006).
۱۳. عباسی، علی‌اکبر، «مطالعه آزمایشگاهی کنترل رسوب در آب‌گیرهای جانبی در مسیرهای مستقیم»، رساله‌ی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی عمران، (۱۳۸۲).
۱٤. سیدیان، سید مرتضی و شفاعی بجستان، محمود، «مقایسه رسوب معلق ورودی به آب‌گیر با تغییر زاویه‌ی دیواره‌ی کانال اصلی از قائم به ٤۵ درجه»، نشریه‌ی آب و خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، صفحه‌ی ۹۹٤-۹۸۵، (۱۳۸۹).
۱۵. گوهری، سعید و همکاران، «تاثیر صفحات مستغرق و آب‌شکن در کنترل رسوب ورودی به آب‌گیر جانبی»، مجله‌ی پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد شانزدهم، شماره دوم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، (۱۳۸۸).